

Umberto Petruccelli
Pietro Vuono

Il costo degli impianti di trasporto verticale

Tecnologie a confronto
in differenti contesti di impiego



Umberto Petruccelli, Pietro Vuono

Il costo degli impianti di trasporto verticale
Tecnologie a confronto in differenti contesti di impiego



Edizioni Nuova Cultura



Copyright © 2024 Università della Basilicata – Dipartimento di Ingegneria – Potenza
Copyright © 2024 Edizioni Nuova Cultura – Roma

ISBN: 9788833657240

DOI: 10.4458/7240

Copertina e Composizione grafica: a cura della Casa Editrice

Revisione a cura dell'Autore



Questo libro è stampato su carta FSC amica delle foreste. Il logo FSC identifica prodotti che contengono carta proveniente da foreste gestite secondo i rigorosi standard ambientali, economici e sociali definiti dal Forest Stewardship Council

È vietata la riproduzione non autorizzata, anche parziale, realizzata con qualsiasi mezzo, compresa la fotocopia, anche a uso interno o didattico.

Indice

1. L'offerta di trasporto in aree acclivi

- 1.1 Il tema
- 1.2 Impianti di trasporto a fune e gli ascensori
- 1.3 Scale e marciapiedi mobili

2. Costo dei sistemi di trasporto verticale

- 2.1 Alternative di offerta e parametri di costo
- 2.2 Costo in funzione del dislivello
- 2.3 Costo per corsa offerta
- 2.4 Costo per posto offerto
- 2.5 Costo per unità di superficie servita

3. Riflessioni per un impiego efficiente ed efficace

1. L'offerta di trasporto in aree acclivi

1.1 Il tema

La necessità di connettere punti del territorio ubicati a quote sensibilmente diverse richiede di solito l'impiego di sistemi di trasporto in grado di superare pendenze elevate così da ridurre il più possibile lo sviluppo del percorso a vantaggio del tempo di viaggio e del costo. Infatti la differente attitudine al superamento delle pendenze che caratterizza ciascun sistema di trasporto influisce sulla lunghezza dei collegamenti producendo come conseguenza una variazione di alcune prestazioni offerte nonché dei costi di investimento e di esercizio.

Generalmente tutti i sistemi di trasporto che si muovono su una via di corsa dedicata, se pure a fronte di investimenti maggiori, garantiscono le migliori prestazioni. Gli oneri di esercizio sono invece funzione inversa del livello di automazione e del gigantismo dei mezzi. In particolare i costi più bassi per veicolo.km offerto si riscontrano generalmente negli impianti con maggiore livello di automazione fra i quali ricadono quelli a fune o a nastro, mentre i minori costi minori per passeggero.km trasportato si ottengono sfruttando il gigantismo dei veicoli conseguente a pesanti infrastrutture dedicate che implicano elevati costi di investimento. Nelle città di maggiori dimensioni possono facilmente trovare impiego sistemi su sede propria importanti, dal momento che i consistenti investimenti necessari sono giustificati dall'entità della domanda da servire.

Il superamento di elevati dislivelli nei collegamenti urbani è un'esigenza che si manifesta in quasi tutte le città di montagna o di collina che presentano spesso dimensioni inferiori rispetto ai grandi centri di pianura e conseguentemente esprimono una domanda di trasporto più contenuta. Pertanto, in questi contesti, la scelta di realizzare connessioni attrezzate con impianti di trasporto che presentano costi ben più elevati rispetto all'autobus impone una valutazione approfondita degli oneri da sostenere e delle prestazioni raggiungibili nonché uno studio attento della domanda attraverso il quale orientare una progettazione efficace dell'intervento e quantificare il beneficio prodotto da quest'ultimo.

La scelta della tecnologia più idonea alla realizzazione di uno specifico collegamento richiede inoltre di tenere conto di aspetti urbanistici, ambientali e sociali nonché delle opportunità che possono nascere dall'esistenza di particolari infrastrutture. Spesso infatti ci si trova in presenza di linee ferroviarie o tranviarie in disuso o scarsamente utilizzate o di strutture e infrastrutture che possono ospitare la via di corsa di impianti funicolari o di ascensori o di rampe meccanizzate. L'opportunità di recuperare un patrimonio esistente può far tendere la convenienza anche per sistemi che in prima analisi possono sembrare superati o economicamente inadatti. I costi di realizzazione e di esercizio rivestono particolare importanza perché da questi dipende la realizzazione ottimale dell'impianto e soprattutto la possibilità di mantenerlo in esercizio recuperando con adeguate manutenzioni il normale logorio dovuto al funzionamento nonché l'obsolescenza funzionale e tecnologica che spesso intervengono durante la lunga vita utile.

Questa monografia mette in relazione il costo di realizzazione e di esercizio di alcune tipologie di impianti di trasporto verticale con alcune prestazioni, in modo da ottenere valori strettamente legati a queste ultime. Dopo una panoramica dei sistemi di trasporto pubblico con maggiore attitudine al superamento delle pendenze si confrontano sei diverse tecnologie, con l'obiettivo di fornire dei costi di riferimento per ciascuna di esse rapportati alle prestazioni offerte ed al contesto orografico e territoriale in cui si vanno ad inserire.

1.2 Impianti di trasporto a fune e ascensori

Con il termine “impianto a fune” si indica un sistema di trasporto di persone o merci realizzato mediante veicoli che viaggiano fra due stazioni di estremità, trainati da funi messe in moto da un organo fisso a terra. Si dividono in due categorie principali:

- **terrestri**, in cui le cabine scorrono su una sede ferroviaria o stradale oppure, in caso di pendenze prossime alla verticale, lungo guide fissate ad una struttura edificata;
- **aerei**, che si appoggiano al terreno solo in corrispondenza delle stazioni e degli eventuali sostegni intermedi delle funi. Pertanto, in questi sistemi, i veicoli viaggiano sempre sospesi ad una o due funi che possono svolgere anche la funzione traente.

Sia gli impianti terrestri che quelli aerei presentano una o due vetture che fanno la spola tra due stazioni terminali oppure più cabine in moto continuo o intermittente spesso sganciabili dalla fune traente in corrispondenza delle stazioni.

Gli impianti aerei si suddividono a loro volta, in base alla funzione svolta dalle funi, in due categorie:

- **bifune** (cableway o ropeway), in cui le funzioni di portante e traente sono assegnate a funi distinte. La presenza di una o più funi adibite soltanto a sostenere il peso delle cabine consente di disporre di campate più lunghe con meno sostegni in linea, cabine di grandi dimensioni (anche da 200 posti) e velocità più elevate (fino a 12 m/s);
- **monofune**, in cui le due funzioni di portante e traente sono assegnate ad un'unica fune; ciò limita la lunghezza delle campate realizzabili fra un sostegno e l'altro ed il peso di ciascuna cabina e pertanto obbliga a ripartire il carico fra più cabine di dimensioni ridotte (o seggiole); il punto di forza di questa tecnologia, nella quale rientrano generalmente le seggiovie (chair lift) e le cabinovie (gondola lift), è rappresentato dalla semplicità e dalla economicità; in questi sistemi, la presenza di numerose cabine distribuite lungo tutta la linea obbliga a mantenere la fune sempre in moto essendo impossibile fermarla ogni volta che una di queste raggiunge una stazione; le cabine o seggiole possono essere collegate permanentemente alla fune oppure agganciarsi e sganciarsi automaticamente a questa in corrispondenza delle stazioni; la seconda alternativa consente velocità di avanzamento della fune notevolmente maggiori (fino a 7 m/s) potendosi comunque effettuare le operazioni di imbarco e sbarco dei passeggeri a cabine o seggiole ferme ovvero in movimento molto lento realizzato all'interno della stazione con uno specifico apparato di trazione a terra.

Pertanto, gli impianti a fune, siano essi terrestri o aerei, possono distinguersi, in base al movimento della fune, in:

- **a va e vieni**, in cui l'anello trattivo di fune inverte il senso di marcia ogni volta che ciascuno dei due veicoli raggiunge una stazione di estremità;
- **unidirezionali**, in cui l'anello trattivo avanza sempre nello stesso senso con un ramo ascendente e l'altro discendente.

Gli ascensori rientrano fra le navette terrestri con moto a va e vieni. La norma europea comprende, fra gli ascensori verticali, gli impianti elevatori la cui via di corsa presenta una inclinazione minore di 15° sulla verticale. Nessuna limitazione è prevista dalle norme in vigore per quanto attiene la capienza massima della cabina e le massime velocità e accelerazione. Tuttavia la velocità massima compatibile con un percorso di lunghezza assegnata è raggiungibile con un diagramma di trazione di tipo triangolare (raramente adottato) situazione comune a qualsiasi servizio di trasporto che viene effettuato fra due estremi a moto discontinuo. La UNI EN 81-22/2021 comprende ascensori

con inclinazione sulla verticale compresa fra 15° e 75°, aventi percorso rettilineo (senza curve nel piano orizzontale) e capienza massima delle cabine di 100 persone (7.500 kg) e velocità non superiore a 4 m/s. Ai sensi della stessa norma, i valori ammissibili per la capienza della cabina e la velocità sono tra loro legati da proporzionalità inversa, in cui si evidenzia la possibilità della capienza massima solo per velocità entro 1 m/s e limitazioni a 3000 kg (40 persone) se la velocità raggiunge valore di 4 m/s. Per garantire l'evacuazione in situazioni di emergenza e la verifica della via di corsa la norma prescrive (UNI EN 81-22/2021) la presenza di una passerella o corridoio o scala di larghezza almeno uguale a 50 cm, sviluppati da un estremo all'altro del percorso. In alternativa è richiesta la presenza di una cabina autonoma adiacente a quella principale che possa raggiungere quest'ultima e permettere il trasferimento dei passeggeri dall'una all'altra cabina oppure combinazione di più soluzioni.

La tecnologia funiviaria, in continua evoluzione fin dagli anni '70 del secolo scorso, ha consentito, in particolare negli ultimi vent'anni, di migliorare le prestazioni del servizio reso, garantendo il raggiungimento di livelli di sicurezza sempre crescenti (si veda p.es. Dalla Chiara et al., 2022) e di estendere al trasporto pubblico urbano l'impiego da questi sistemi, in origine limitato alle aree montane (si veda p.es. Alshalalfah, 2012 e Sproule, 2022). In particolare, le innovazioni tecnologiche hanno riguardato l'introduzione della doppia fune portante/traente nella cabinovia monofune, e della doppia fune portante nella funivia bifune, talvolta con la conseguente creazione di sistemi ibridi fra monofune e bifune. Inoltre, l'opportunità di estendere il campo di impiego di questi impianti ha indotto a proporre sistemi bimodali in cui le cabine possono muoversi in modo autonomo una volta sganciate dalla fune. Alcune innovazioni tecnologiche hanno prodotto anche nuove modalità di esercizio soprattutto per quanto attiene il soccorso e l'evacuazione dei viaggiatori dall'impianto (come discusso in Caserza, 2019) e la necessità di prevedere il piano ultimo nonché la possibilità di eliminare il freno sulla portante.

Anche la regolamentazione normativa, per la costruzione e l'esercizio degli impianti a fune, nel corso degli anni ha fatto notevoli passi in avanti, con l'introduzione di standard di sicurezza sempre più elevati nonché sulle indicazioni in merito alla valutazione dei costi di riferimento. In particolare, il processo di unificazione delle norme del settore è iniziato con la Direttiva 2000/9/CE del 20 marzo 2000 che ha indirizzato le norme nazionali successivamente emanate nei diversi stati membri. In Italia il recepimento di questa Direttiva ha portato ad aggiornare progressivamente la normativa del settore attraverso il D.lgs. 12 giugno 2003, n.210 (Repubblica Italiana 2003), successivamente con il DD. MIT 16 novembre 2012, n.337 (Repubblica Italiana, 2012) e infine con il DD. MIMS 18 giugno 2021, n. 172 (Repubblica Italiana, 2021), norma oggi in vigore. Per quanto attiene l'esercizio, il DM. MIT 11 maggio 2017, n.86 (Repubblica Italiana, 2017) ha aggiornato ed integrato le prescrizioni contenute nel DM MTN 4 agosto 1998, n.400 (Repubblica Italiana, 1998).

Gli aspetti regolamentari analizzati anni addietro da uno degli autori in Petruccelli (2013), sono stati poi, in Petruccelli et al. (2023), aggiornati e messi in relazione con alcune specifiche questioni di sicurezza riguardanti l'evacuazione degli impianti e l'eventuale Piano ultimo, nonché la tendenza all'eliminazione del freno di soccorso sugli impianti bifune, già prevista dall'art.24 comma 10 del D.M. 4 agosto 1998, n. 400 (Repubblica Italiana, 1998) e specificatamente disciplinata dalla norma UNI-EN12929-2 del 2015 (UNI, 2015) e, più di recente, dal già citato DD. 172/2021 (Repubblica Italiana 2021).

In tema di costi di costruzione c'è da rilevare che la Decreto del Presidente della Provincia di Bolzano (DPP) del 2006 (Provincia Autonoma di Bolzano, 2006), che indicava delle formule regressive per la determinazione del costo di costruzione di alcune tipologie di impianti a fune, è stata aggiornata prima nel 2012 (Provincia Autonoma di Bolzano, 2012) e poi nel 2020 (Provincia Autonoma di Bolzano, 2020). Queste ultime disposizioni hanno rivisto i parametri di calcolo del costo

sulla base di dati più recenti, talvolta prendendo in considerazione anche nuove tecnologie le cui specificità non consentono di assimilarne i costi a tipologie tradizionali.



Figura 1

Funivia bifune classica a va e vieni (navetta a due cabine)



Figura 2

Cabinovia monofune a moto continuo (con molte cabine)



Figura 3

Funicolare terrestre (navetta a due cabine)



Figura 4

Ascensore inclinato (navetta ad una sola cabina)

1.3 Scale e marciapiedi mobili

Questi sistemi rientrano nella categoria dei nastri, costituiti da una catena chiusa, formata da gradini o pedane, in movimento continuo unidirezionale e sono regolati dalla norma UNI EN 115-1/2017 (Parte 1) e dalla UNI EN 115-2/2021 (Parte 2). La velocità del nastro è molto ridotta per consentire un facile e sicuro ingresso e uscita dalla rampa del passeggero in piedi. La velocità tuttavia non limita sensibilmente la capacità, comunque di livello medio per questi impianti, in quanto è compensata dalla possibilità di raggiungere una densità di passeggeri molto elevata. Incide invece negativamente sul tempo di percorrenza limitandone quindi l'impiego su distanze elevate. Per tali sistemi, in accordo alla UNI 115-1/2017 (punto 5.4.1.2.2) la velocità massima è pari a 0,75 m/s. Per i marciapiedi mobili la velocità massima prevista dalla UNI 115 può raggiungere 0,90 m/s rispettando alcune caratteristiche costruttive.

Secondo la UNI 115 le dimensioni del gradino delle rampe mobili sono un'altezza (alzata) massima di 24 cm da ridurre a 21 cm qualora la scala fuori servizio possa essere usata come uscita di emergenza ed una profondità (pedata) minima di 38 cm. Combinando la massima altezza consentita al gradino con la minima profondità si ottiene la pendenza massima consentita per la rampa = $24/38 = 63\% = 32^\circ$. Tuttavia il punto 5.2.2 della UNI 115 ammette per le scale mobili una pendenza massima di $30^\circ = 58\%$ elevabile fino a $35^\circ = 70\%$ se il dislivello superato dalla singola rampa è limitato a 6 m e la velocità è contenuta in 0,50 m/s. La finalità sembra quella di limitare le conseguenze di una accidentale caduta del passeggero. La pendenza massima ammessa per i marciapiedi mobili è invece di $12^\circ = 21\%$ (punto 5.2.2 della UNI 115) che rappresenta un valore tutt'altro che trascurabile. Naturalmente il profilo del terreno o pendenza naturale è un fattore determinante nella scelta fra rampe e marciapiedi mobili soprattutto se si vuole massimizzare lo sviluppo a raso del percorso meccanizzato limitando in tal modo i costi di realizzazione delle opere civili e aumentando l'accessibilità al sistema. È evidente comunque che la scelta di marciapiedi mobili è più costosa a parità di dislivello da superare. La maggiore velocità consentita ai marciapiedi rispetto alle scale (0,90 contro 0,75 m/s) permette in linea di principio tempi di percorrenza inferiori contenendo, sebbene in minima parte, il limite principale dei nastri consistente nelle basse velocità. Tuttavia l'utilizzo di marciapiedi mobili al posto delle rampe mobili costringe il più delle volte ad allungare sensibilmente il percorso pedonale con conseguente aumento dei tempi di viaggio.



Figura 5 – Scala mobile



Figura 6 – Marciapiede mobile

2. Costo dei sistemi di trasporto verticale

2.1 Alternative di offerta e parametri di costo

I sistemi di trasporto messi a confronto sono autobus (o filobus), tram, nastro (scale e marciapiedi mobili) e, mosse da funi, navette a vai e vieni e cabinovie ad ammorsamento automatico. La scelta di considerare anche l'autobus è motivata dal fatto che questo è il mezzo indubbiamente più diffuso grazie alla massima flessibilità ed economicità e pertanto rappresenta un termine di paragone. Il tram, sebbene non particolarmente adatto a superare dislivelli, può vantare invece una capacità maggiore dell'autobus a fronte di una necessità di investimenti nettamente inferiori a quelli di una metropolitana, caratteristiche che lo rendono proponibile anche in città di medie dimensioni; pertanto si pone come riferimento relativamente a questa prestazione. Inoltre, sono stati esaminati il nastro, ampiamente diffuso nelle città collinari e molto gradito all'utenza perché annulla i tempi di attesa, la navetta a fune, sistema particolarmente vocato a superare pendenze elevate (fino a 90° nel caso di ascensori verticali) e che presenta inoltre la particolarità di disporre di sole due cabine (funicolari e funivie) o addirittura di una sola (ascensori verticali o inclinati) ed è pertanto penalizzato in termini di capacità, soprattutto sui percorsi lunghi, rispetto ad un sistema a più veicoli come l'autobus, il tram o la cabinovia. Infine, per completezza, si è presa in considerazione anche la cabinovia a moto continuo, molto utile in aree urbane perché in grado quasi di annullare il tempo di attesa ed offrire una buona capacità di trasporto che, tra l'altro, a differenza delle navette, è indipendente dalla lunghezza del percorso.

I sistemi di trasporto considerati sono stati confrontati sotto l'aspetto economico. In particolare si sono analizzati il costo di investimento complessivo e quello di esercizio specifico per ora di funzionamento nonché i costi specifici di investimento e di esercizio per corsa/ora, per posto offerto/ora, per ettometro di dislivello superato e per ettaro di area servita.

I risultati dell'analisi sono riportati sotto forma di grafici e tabelle che rappresentano anche un semplice strumento in grado di fornire una prima indicazione circa gli investimenti da prevedere per la realizzazione e il budget necessario per l'esercizio in funzione di alcuni parametri dimensionali.

Nello specifico, si è studiato l'andamento, al variare del dislivello da superare, dei costi di investimento e di esercizio specifici per unità di lunghezza della linea o per unità di prestazione offerta. Le stime di detti valori sono state sviluppate a partire da dati riportati in Petruccelli (2010) e opportunamente aggiornati all'attualità. In particolare al sistema autobus è stato attribuito un costo di investimento che è funzione dei veicoli utilizzati nel servizio il cui numero dipende dalla lunghezza della linea, dalla velocità commerciale e dalla frequenza delle corse. Nel costo di acquisto assunto per ogni autobus è stata compresa anche una quota parte dei costi di investimento per depositi, officine, uffici. Pertanto il costo unitario di impianto assunto è riferito ad un km di linea su cui è presente un solo veicolo; detto costo viene incrementato, nelle elaborazioni, in funzione del numero di rotabili effettivamente necessario per mantenere la frequenza di volta in volta assegnata, sul percorso di lunghezza definita, in presenza della velocità commerciale assunta. Sull'investimento per la realizzazione di un servizio di tram incide invece consistentemente il binario e la linea di alimentazione i cui costi di impianto sono proporzionali allo sviluppo; il numero dei rotabili necessari è determinato allo stesso modo del sistema autobus ponendolo in relazione con la frequenza del servizio, la lunghezza della linea e la velocità commerciale.

Nella fattispecie il costo di acquisto, di un autobus è stato assunto pari a 242 migliaia di Euro, mentre quello di un tram a 2.805 migliaia di Euro. Entrambi i valori sono stati determinati secondo le indicazioni dell'allegato n°4 del D.M. 157/2018, con riferimento ad un autobus urbano da 12m, alimentato a gasolio ed a un tram da 32m.

Differente è il discorso per quanto attiene i nastri e le navette. Nel primo caso infatti la frequenza è infinita e il percorso meccanizzato comprende generalmente tratti meccanizzati e non, dove l'incidenza dell'impiantistica è molto diversa. Pertanto sono state necessarie le seguenti assunzioni:

- le rampe presentano tutte la pendenza massima di 30° ammessa dalla normativa in vigore senza limitazioni di lunghezza;
- il costo di investimento è comprensivo dei tratti meccanizzati e non, che realizzano nell'insieme un percorso pedonale meccanizzato;
- il costo di esercizio è riferito all'unità di percorso o di dislivello superato per un arco temporale di funzionamento dell'impianto ed è comprensivo dei consumi, delle manutenzioni, della guardiania e di ogni servizio accessorio strettamente necessario.

Relativamente alle navette, che come già specificato in precedenza comprendono tutti gli impianti a vai e vieni con una cabina come gli ascensori o con due cabine come le funicolari aeree e terrestri, il costo di impianto è stato determinato avvalendosi del Decreto della Provincia di Bolzano n.41/2020 (aggiornamento dei precedenti DPP n.44/2012 e n.61/2006) che fornisce delle formule regressive per stimare il costo di realizzazione degli impianti a fune, in funzione della lunghezza della linea, della capienza delle cabine e anche del numero di sostegni, con riferimento ai diversi tipi di impianti. È comunque da considerare che le formulazioni ed i relativi coefficienti stabiliti dai DPP della Provincia di Bolzano sono ricavati da regressioni su data base riferiti ad impianti esistenti i cui costi reali possono essere influenzati anche sensibilmente dal contesto territoriale, orografico e geologico delle realizzazioni nonché dalle soluzioni architettoniche adottate per le stazioni e infine dal numero molto ridotto di imprese partecipanti alla gara per l'affidamento dei lavori di costruzione. Pertanto il costo di investimento unitario assunto è quello relativo ad un impianto lungo 1 km con cabine di capienza idonea al raggiungimento della capacità richiesta nelle diverse elaborazioni; in ciascuna elaborazione detto costo è stato rideeterminato con la stessa formula ogni volta che si è considerato un impianto di differente lunghezza. Il costo di esercizio per le navette è stato assunto pari a quello dei nastri in considerazione del completo automatismo di funzionamento che accomuna le due tipologie di impianto.

È bene precisare che tutti i costi di investimento e di esercizio stimati per i sistemi messi a confronto sono parametri medi indicativi, tratti da bibliografia e/o da realizzazioni che possono talvolta differire sensibilmente da casi specifici ma presentano un ordine di grandezza sufficientemente attendibile per il livello di analisi condotta nel presente studio. In sintesi i costi parametrici assunti nelle elaborazioni sono riportati nella tabella 1.

SISTEMA	Autobus	Tram	Nastro	Navetta	Cabinovia
Costo di investimento	0,39 ML€/km linea (freq. Max 10')	21,86 ML€/km linea	33,44 ML€/km linea 14,15 ML€/hm dislivello	13,44 ML€/km linea (L=1km; cab.200p)	27,51 ML€/km linea (L=1km; cab.50p)
Costo di esercizio	3,9 €/(bus.km) per (V=20 km/h) 5,4 €/(bus.km) per (V=15 km/h)	10,3 €/(tram.km)	285 €/h/km linea 113 €/h/hm dislivello	285 €/h/km linea 113 €/h/hm dislivello	300 €/h/km linea 119 €/h/hm dislivello

Tabella 1
Costi specifici di investimento e di esercizio

In essa si è ritenuto più utile per un eventuale raffronto riportare, relativamente ai nastri, i costi, oltre che per chilometro di sviluppo della linea, anche per ettometro di dislivello superato, dal momento che questi impianti presentano generalmente rampe con pendenza costante che influenzano il costo di investimento e di esercizio in modo decisamente preponderante rispetto ai tratti non meccanizzati pressoché pianeggianti inseriti nel percorso. Il riferimento agli ettometri di dislivello sembra più adatto rispetto ai chilometri di sviluppo dato che una linea di autobus, per la quale si accetta normalmente una pendenza massima non superiore al 10%, deve sviluppare un percorso non inferiore ad un chilometro per superare un dislivello di un ettometro.

Con riferimento alla tabella 1, è opportuno precisare quanto segue:

- Relativamente ai sistemi per i quali non sono intervenute variazioni normative in grado di incidere sui costi ci si è avvalsi dei valori riportati in Petruccelli (2010) operando una rivalutazione monetaria dei prezzi al consumo da gennaio del 2010 al dicembre del 2023 moltiplicando per il coefficiente di rivalutazione ISTAT pari a 1,286;
- 0,39 ML€/km è il prezzo di un autobus (IVA esclusa) comprensivo di quota parte degli investimenti per le strutture necessarie alla gestione del servizio (deposito, uffici e officina);
- 3,9 €/(bus×km) e 5,4 €/(bus×km) per velocità rispettivamente di 20 e 15 km/h rappresentano il costo di esercizio medio del servizio pubblico urbano su autobus in città di medie e piccole dimensioni, con livelli di congestione stradale non eccessivi. Entrambi i valori sono stati ottenuti dalla formulazione del costo standard unitario tratta dal D.M. 158/2018, assumendo l'ammmodernamento del materiale rotabile per unità di servizio pari a 0.37 Euro/Bus.km e mediando i risultati ottenuti in corrispondenza di una quantità di servizio prodotta pari a 4 e 10 ML.bus.km/anno;
- 21,86 ML€/km di linea è il costo medio stimato per la realizzazione di una linea tranviaria su strada esistente e l'acquisto dei rotabili necessari a produrre un servizio su di una linea di 1 km con frequenza massima di 10 minuti;
- I costi di investimento e di esercizio dei percorsi meccanizzati (nastri) sono stati stimati, sempre partendo da quanto riportato in Petruccelli (2010), assumendo un funzionamento di 15 ore giornaliere per 365 giorni all'anno.

L'applicazione delle formule riportate nell'allegato 9 e 10 del DPP Bolzano n.41/2020 ha permesso di stimare i costi di realizzazione della navetta (assimilata ad una funivia bifune) e della cabinovia. Solo per le navette è stato previsto l'impiego di un sostegno ogni due chilometri di linea e tale valore è stato opportunamente proporzionato alla lunghezza effettiva in funzione del dislivello.

Il costo convenzionale calcolato per le funivie aeree bifune a vai e vieni con doppia via di corsa è stato associato anche agli ascensori. L'assunzione è giustificata, in assenza di dati specifici, dalla considerazione che il minor costo della meccanica ascensoristica, conseguente ad una maggiore semplicità e standardizzazione rispetto alla meccanica propriamente funiviaria, è compensato dalla maggiore incidenza delle opere civili necessarie per realizzare la via di corsa allorché non è inserita in un fabbricato esistente. Lo stesso discorso vale per le funicolari terrestri che non presentano la fune portante ed i relativi sostegni come la funivia aerea ma richiedono la realizzazione di una via di corsa a terra, attrezzata con armamento ferroviario.

2.2 Costi in funzione del dislivello

La prima analisi attinente alle risorse necessarie ha teso ad evidenziare l'andamento dei costi di investimento e di esercizio al variare del dislivello da superare. Naturalmente, per i sistemi a vetture multiple (bus e tram), è stato necessario stabilire la frequenza del servizio che influisce sulla percorrenza prodotta nell'unità di tempo e quindi sul costo di esercizio. La frequenza è stata assunta

pari a 6 corse/ ora per ciascun senso di marcia corrispondente ad un intertempo fra corse successive di 10 minuti primi. Per tutti i sistemi, ad eccezione dei nastri, si sono dovute fare delle ipotesi sulla velocità commerciale che condiziona, nei sistemi a vetture multiple, il numero di queste ultime necessario a realizzare il servizio con la frequenza assegnata e, per le navette funicolari che invece presentano solo due cabine, per verificare che la frequenza richiesta risulti compatibile con il tempo di percorrenza di volta in volta calcolato.

Per l'autobus e il tram sono state assunte diverse velocità commerciali, rispettivamente pari a 15 e 20 km/h e 15, 20 e 25 km/h, rappresentative di differenti distanze medie fra le fermate e velocità di deflusso veicolare rilevabili nella maggior parte delle realtà urbane. Le velocità medie delle navette sono state assunte pari ai valori massimi più comunemente raggiunti negli impianti più moderni sulla base della pendenza media; in particolare si sono ipotizzati, come già in precedenza, valori di 4, 8 e 12 m/s rispettivamente per impianti con inclinazione sull'orizzontale di 90°, 60° e 30°, dove al primo tipo corrispondono essenzialmente gli ascensori verticali, mentre inclinazioni minori fanno riferimento a tutte le altre tipologie di impianto. Poiché per le navette il costo è determinato con la formula proposta dalla delibera della Provincia di Bolzano che tiene conto sia della lunghezza dell'impianto che della capienza della cabina, si sono adottati per quest'ultimo parametro valori crescenti progressivamente con il dislivello da superare in considerazione della tendenza a prevedere cabine di dimensioni maggiori al crescere della lunghezza dell'impianto per compensare la riduzione di capacità conseguente all'aumento del tempo di percorrenza. Nello specifico, la corrispondenza fissata fra dislivello superato (e quindi sviluppo del percorso) e capienza della cabina è riportata nella tabella 2.

Dislivello (m)	Capienza cabina (posti)
10	10
20	20
50	30
100	40
200	50
300	70
500	100

Tabella 2

Corrispondenza fra dislivello superato e capienza della cabina nei sistemi a navetta considerati

Tale considerazione, non è stata invece applicata nel calcolo dei costi relativi alla cabinovia in quanto, come anticipato, la formula della Provincia di Bolzano necessita solo della lunghezza dell'impianto (funzione del dislivello una volta fissata la pendenza massima) e del numero di passeggeri/ora che in questo caso è stato assunto pari al valore massimo disponibile. Le figure 7, 8 e 9 mostrano un andamento lineare dei costi per tutti i sistemi eccetto che per il costo di impianto delle navette dove tuttavia le fluttuazioni del relativo diagramma sono conseguenza della variazione discreta contemporanea dei due parametri da cui la formula fa dipendere il costo, cioè la lunghezza della linea e la capienza della cabina.

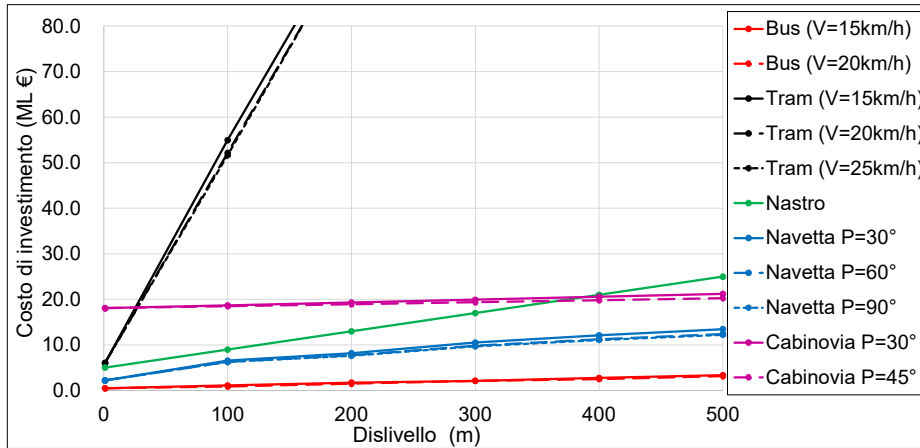


Figura 7
Costi di investimento (0÷80 ML€) in funzione del dislivello

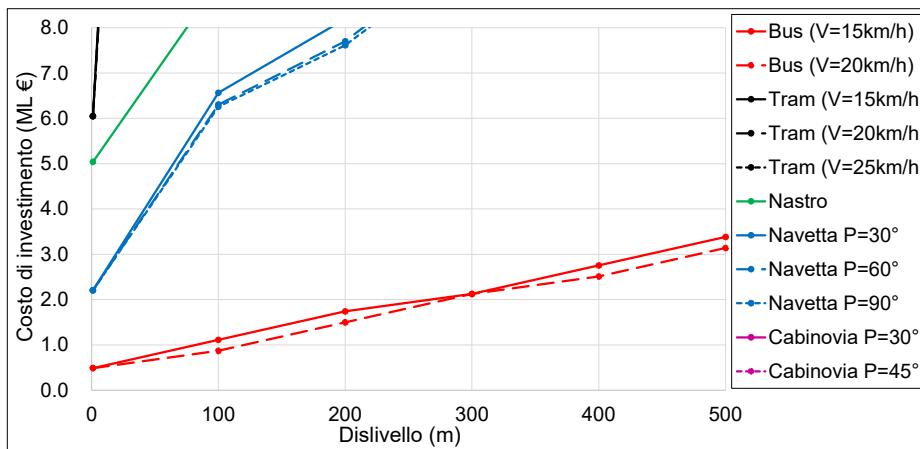


Figura 8
Costi di investimento (0÷8 ML€) in funzione del dislivello

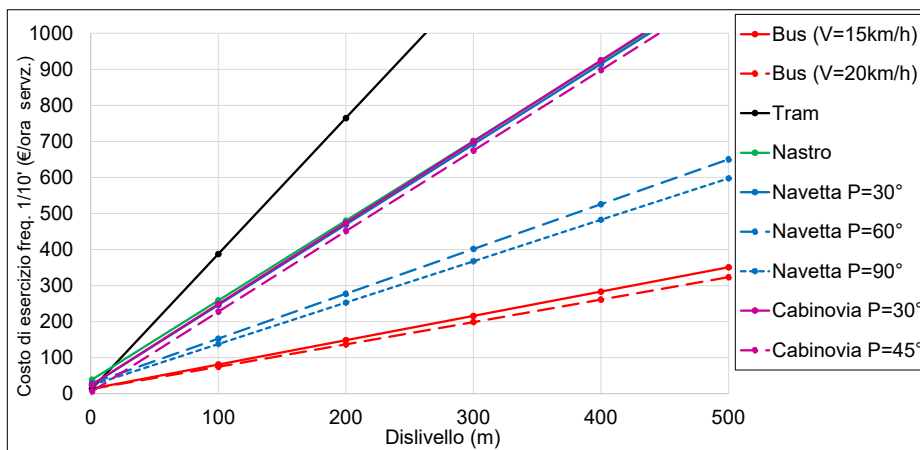


Figura 9
Costi di esercizio per ora di servizio in funzione del dislivello, con frequenza 1/10'

Risultano immediatamente evidenti i costi notevolmente maggiori del tram rispetto agli altri sistemi; questi ultimi si avvantaggiano di costi unitari minori, sia di investimento che di esercizio, e di una maggiore attitudine al superamento delle pendenze che abbrevia lo sviluppo del percorso. È da notare come per autobus e tram l'influenza della velocità commerciale sui costi diventi più sensibile al crescere del dislivello da superare e quindi della lunghezza del percorso (i relativi diagrammi

sono divergenti). L'autobus risulta nettamente il mezzo più economico mentre in posizione intermedia si collocano i nastri (considerati monoposto nella elaborazione in questione) e le navette. Il costo di investimento per i nastri è leggermente superiore alle navette fino ad un dislivello di circa 100 m dopodiché queste ultime risultano sensibilmente favorite per via della flessione delle curve relative che manifestano una sorta di economia di dimensione di questo tipo di impianti in funzione della lunghezza e quindi del dislivello. Si registra, infine, come l'andamento dei costi di esercizio dei nastri sia molto simile a quello delle navette e delle cabinovie con la stessa inclinazione (30°), in conseguenza delle assunzioni precedentemente discusse circa i costi unitari.

2.3 Costi per corsa offerta

Nel seguito si sono messi in relazione, con il dislivello da superare, i costi specifici di investimento e di esercizio per chilometro di linea e per corsa offerta. Naturalmente non si è tenuto conto dei nastri e della cabinovia a moto continuo in quanto entrambe presentano una frequenza infinita. Anche in questo caso si è reso necessario fissare alcuni parametri. In particolare si è assunta per autobus e tram, per una più immediata lettura dei relativi diagrammi, una sola alternativa di velocità commerciale (15 km/h), la frequenza è stata anche in questo caso mantenuta a 6 corse/ora per senso di marcia (1 corsa ogni 10 minuti) e la pendenza massima delle navette messe a confronto è stata di 60°. I risultati delle elaborazioni confermano i costi nettamente maggiori del tram rispetto agli altri sistemi, sia per via del maggiore sviluppo della linea necessario per superare i dislivelli assegnati, sia per effetto dei più alti costi unitari. Le figure 10, 11 e 12 presentano i diagrammi del costo di investimento (riprodotto in due scale diverse per evidenziare l'andamento relativo di autobus e navetta) e del costo di esercizio. I risultati dimostrano come la navetta presenti un costo di investimento crescente con il dislivello in modo meno che lineare (concavità della curva verso il basso) evidenziando economie realizzabili al crescere della lunghezza dell'impianto.

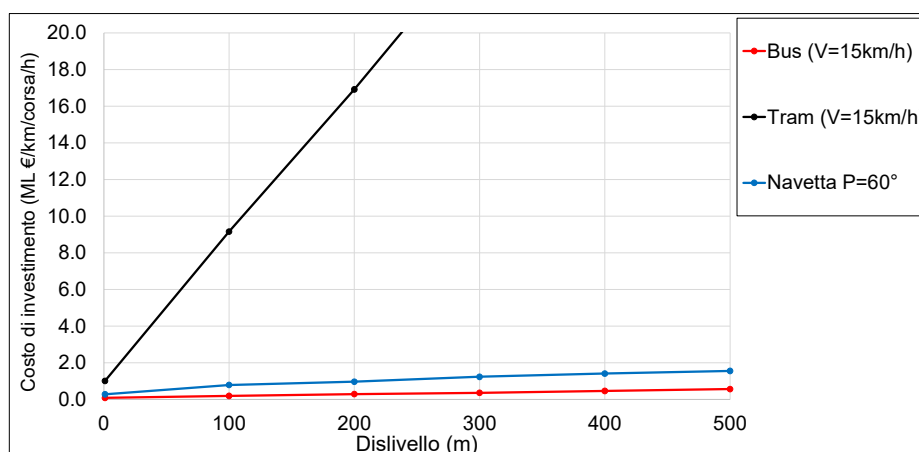


Figura 10

Costo specifico di investimento (0÷20 ML€) in funzione del dislivello (0÷500 m), per 1 km di linea e per 1 corsa /h, con frequenza del servizio di 10 minuti primi

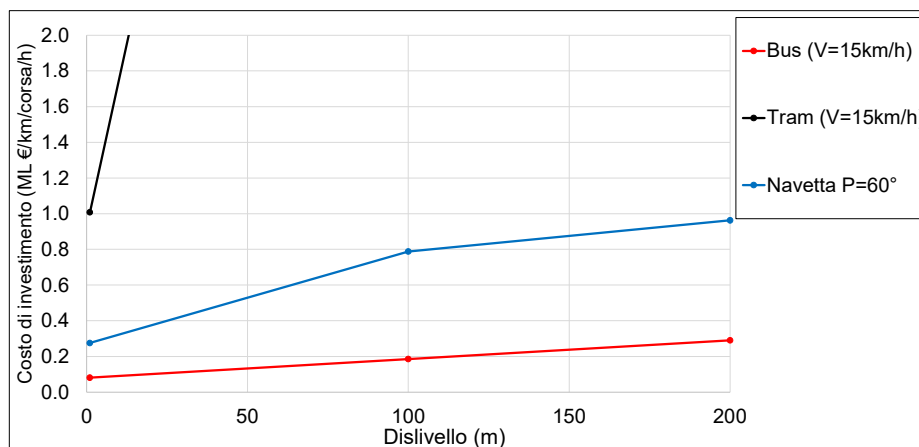


Figura 11

Costo specifico di investimento (0÷1 ML€) in funzione del dislivello (0÷200 m), per 1 km di linea e per 1 corsa /h, con frequenza del servizio di 10 minuti primi

In valore assoluto su ciascuna delle 6 corse realizzate in un'ora per ogni km di linea con un dislivello di 100 m pesa un investimento di 0,19, 0,79 e 9,16 ML€/km/corsa/h ed un costo di esercizio di 12,8, 19,6 e 65,3 €/h/corsa rispettivamente per l'autobus, la navetta ed il tram, confermando ancora una volta l'economicità dell'autobus.

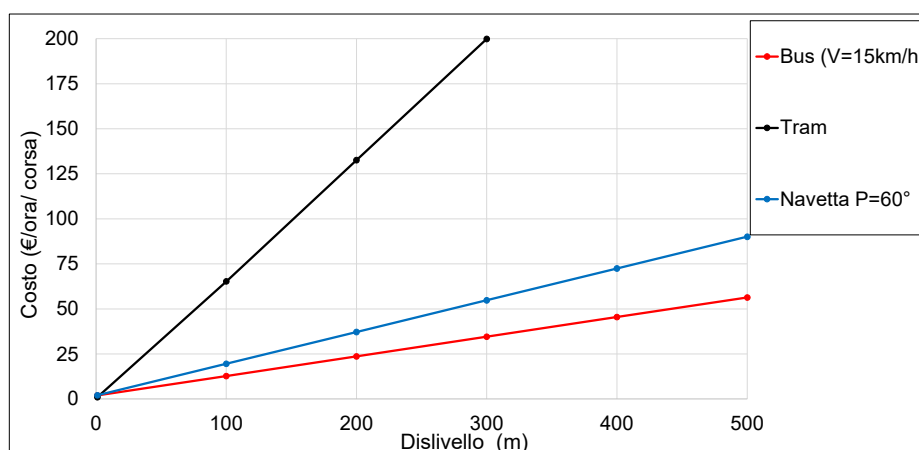


Figura 12

Costo specifico di esercizio in funzione del dislivello, per 1 corsa /h, con frequenza del servizio di 10 minuti primi

2.4 Costi per posto offerto

Successivamente, sono stati confrontati, per i diversi sistemi, i costi di investimento e di esercizio in funzione del dislivello superato e del numero di posti offerti per ora ed in particolare sono state fatte le seguenti assunzioni:

- una frequenza spinta ai valori massimi generalmente accettabili di 20 corse/h per ciascun senso di marcia relativamente ad autobus e tram; tale frequenza è stata attribuita anche alle navette allorché la lunghezza del percorso e la velocità di marcia consentono di raggiungerla; in caso contrario è stata assunta la frequenza massima realizzabile;
- capienza di 120 posti per gli autobus di 300 per i tram, 50 posti per la cabinovia e di 10 – 100 posti per le navette variabile con il dislivello da superare;

- pendenza massima superabile dal sistema navetta pari a 60° e di 45° per la cabinovia, con velocità massima rispettivamente di 8 m/s e 7 m/s;
- capacità dei nastri = 5400 e 10800 passeggeri/h rispettivamente per gli impianti monoposto e biposto, assumendo, per questi ultimi, costi maggiori del 20% rispetto ai primi.

Ad eccezione delle navette, i diagrammi dell'andamento dei costi al variare del dislivello sono tutti rappresentati da rette orizzontali dato che il dislivello condiziona direttamente (o indirettamente tramite lo sviluppo della linea) i costi di investimento e di esercizio. I diagrammi costruiti evidenziano ancora una volta gli elevati costi di investimento del tram seguiti dalla cabinovia, dalla navetta per un dislivello maggiore di circa 80 m, dal nastro e infine dall'autobus. In particolare, il costo di investimento per ciascun posto/h offerto per ettometro di dislivello è di circa 13 migliaia di € per il tram, circa 10 migliaia di € per la cabinovia, circa 1,8 e 1,5 migliaia di € rispettivamente per i nastri monoposto e biposto, un costo variabile da 25 migliaia di € a 1,2 migliaia di € per la navetta in funzione del dislivello fra le stazioni di monte e di valle ed infine meno di 200 € per l'autobus. Per quanto riguarda i costi di esercizio, invece, si osserva come il sistema più svantaggioso continua ad essere il tram, seguito dalla cabinovia, dalla navetta, dall'autobus e, come più economico, il nastro. In particolare, per ogni posto/ora offerto su un dislivello di 100 m si spendono per l'esercizio 23,1, 18,7, 15,2, 10,1, 6,2 e 3,2 € nell'ordine utilizzando il tram, la cabinovia, la navetta, l'autobus, il nastro monoposto ed il nastro biposto. Le figure 13, 14 e 15 riportano i diagrammi in questione.

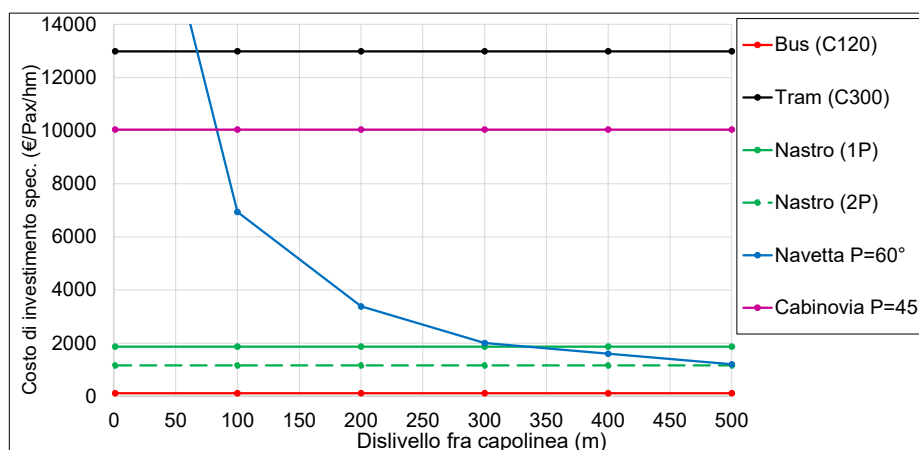


Figura 13

Costo di investimento (0÷14.000 €) per posto offerto, per ora e per ettometro di dislivello, in funzione del dislivello

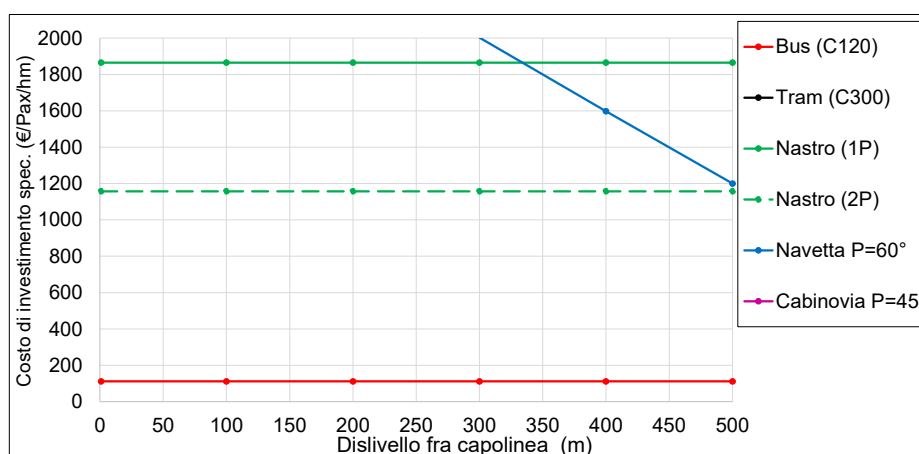


Figura 14

Costo di investimento (0÷2.000 €) per posto offerto, per ora e per ettometro di dislivello, in funzione del dislivello

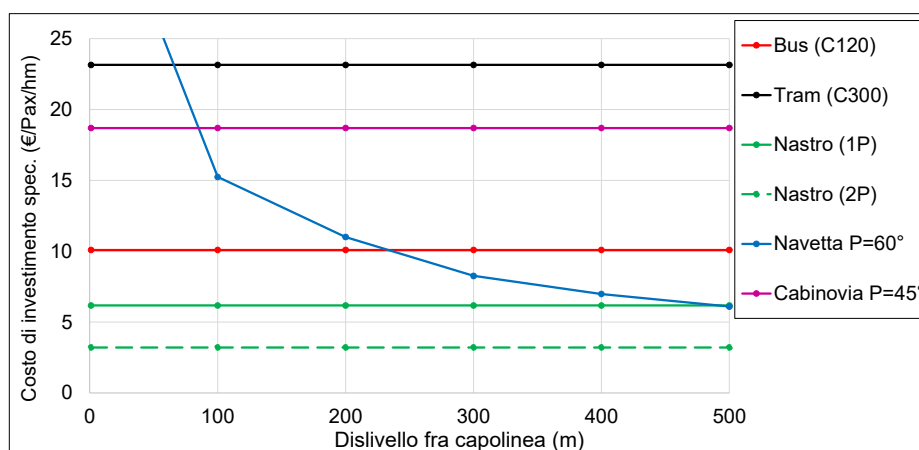


Figura 15

Costo di esercizio per posto offerto, per ora e per ettometro di dislivello, in funzione del dislivello

2.5 Costi per unità di superficie servita

Come è noto, a ciascun sistema di trasporto pubblico è associabile una distanza di rifiuto intesa come la distanza massima che l'utente accetta di percorrere a piedi per raggiungere la fermata e fruire del servizio. In linea generale tale grandezza è funzione delle prestazioni del sistema, quali velocità commerciale, frequenza, accessibilità, confort e della facilità ed amenità del percorso a piedi, in relazione a quelle delle alternative di trasporto a disposizione. In particolare sulla facilità e piacevolezza del percorso incide sensibilmente la pendenza. A tal proposito è da considerare che, se la salita rende più faticoso il cammino, la discesa, pur facilitandolo, non consente al marciatore di recuperare l'energia spesa per salire e quindi non compensa lo sforzo fatto percorrendo in senso opposto il tragitto. È indubbio quindi che una orografia sfavorevole riduce la distanza di rifiuto. La misura di tale riduzione, pur variando con l'età del marciatore, è stata studiata in passato proprio per mettere a punto una relazione fra la pendenza e la riduzione del raggio di influenza dei servizi che fosse sufficientemente rappresentativa del maggiore sforzo mediamente richiesto per camminare in salita piuttosto che in piano. Secondo uno studio riportato in Petruccelli (2010), esiste una relazione fra la pendenza media del terreno espressa in percentuale (P) ed il fattore (R) attraverso il quale ridurre il raggio di influenza di un servizio, secondo la tabella 3.

P (%)	0	5	10	15	20	25	30	35	40
R	1	0.85	0.638	0.505	0.385	0.32	0.26	0.214	0.167

Tabella 3

Riduzione del raggio di influenza in funzione della pendenza

Detta relazione è altresì esprimibile attraverso la formula esponenziale appresso riportata, rappresentativa di una curva interpolante i punti individuati dai valori tabellati su un diagramma.

$$R = e^{-0,0449 P} \quad (1)$$

Utilizzando questa formula è possibile pertanto ridurre la distanza di rifiuto per tener conto della pendenza del terreno nel percorso di avvicinamento alle fermate o stazioni del sistema di trasporto considerato. Assumendo, come è consuetudine, l'area di influenza di una linea di trasporto pubblico come una fascia di larghezza pari al doppio della distanza di rifiuto nella quale la linea stessa rappresenta la mezzeria, tale fascia presenterà nella realtà una larghezza tanto minore

quanto più accentuata si presenta la pendenza del terreno in direzione trasversale alla linea di trasporto. In un'analisi di dettaglio in area urbana detta pendenza andrebbe rilevata punto per punto dal momento che le opere di urbanizzazione possono modificare sensibilmente l'andamento altimetrico del suolo con terrapieni o sterri e linee di discontinuità artificiali. Tuttavia in un'analisi di massima, finalizzata a mettere a punto un raffronto più generale fra le aree di influenza di sistemi di trasporto diversi, è accettabile non tenere conto di tali modificazioni indotte nella conformazione del suolo e associare al terreno un andamento schematico e quindi calcolare la fascia di influenza della linea di trasporto tenendo conto della pendenza trasversale media che il terreno avrebbe avuto in assenza di opere di urbanizzazione. Tale generalizzazione è rafforzata dalla considerazione che la realizzazione di opere di sostegno, sebbene produca una modificazione della pendenza del terreno nell'intorno dell'opera, non apporta modificazioni alla pendenza media misurata su distanze maggiori.

Per calcolare la pendenza trasversale alla linea è opportuno distinguere i due casi:

- a) sistema di trasporto stradale;
- b) sistema di trasporto su sede propria a forte inclinazione.

Nel primo caso il percorso è vincolato all'andamento delle infrastrutture stradali che generalmente non si sviluppano perpendicolarmente alle curve di livello, cioè secondo la pendenza massima del terreno anche per via della limitata pendenza massima superabile con sicurezza dai veicoli stradali. Nel secondo caso, la necessità di limitare lo sviluppo di una sede dedicata e la possibilità di superare pendenze elevate spingono ad orientare il tracciato secondo la pendenza massima del terreno.

Le considerazioni fin qui fatte a proposito della relazione fra distanza di rifiuto e pendenza rendono evidente la necessità di fermate molto più ravvicinate per nastri e navette rispetto ai sistemi stradali (autobus e tram), per effetto della forte pendenza longitudinale dei primi che riduce l'area di influenza in questa direzione, e la possibilità di contare su una larghezza della fascia di influenza molto estesa per via della pendenza trasversale pressoché nulla conseguente ad uno sviluppo del percorso perpendicolare alle curve di livello. Pertanto, in linea di principio, su di un terreno di assegnata pendenza, nel collegamento fra due punti collocati a quota diversa, il sistema che presenta la pendenza massima superabile più ridotta svilupperà un percorso maggiore e con una pendenza trasversale più accentuata e quindi realizzerà una copertura del territorio espressa da una fascia di influenza più lunga ma di minore larghezza; per contro il sistema che può muoversi su pendenze più elevate svilupperà certamente un percorso più breve con una pendenza trasversale minore che darà luogo ad una fascia di influenza più corta ma di larghezza maggiore. Ciò non ci consente di sostenere la superiorità di un sistema rispetto all'altro relativamente alla superficie servita o area di influenza che ad esso compete. È necessario quindi mettere in relazione, per ciascun sistema esaminato, l'area di influenza realizzata tenendo conto della pendenza massima superabile, con la pendenza del terreno, in presenza di valori diversi del dislivello.

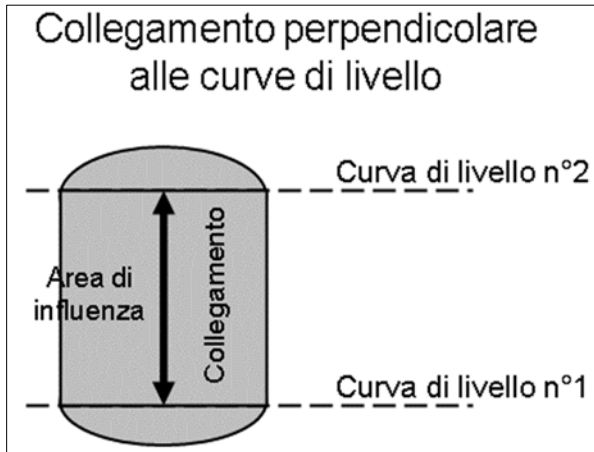


Figura 16

Schema di un collegamento realizzato con la stessa pendenza del terreno

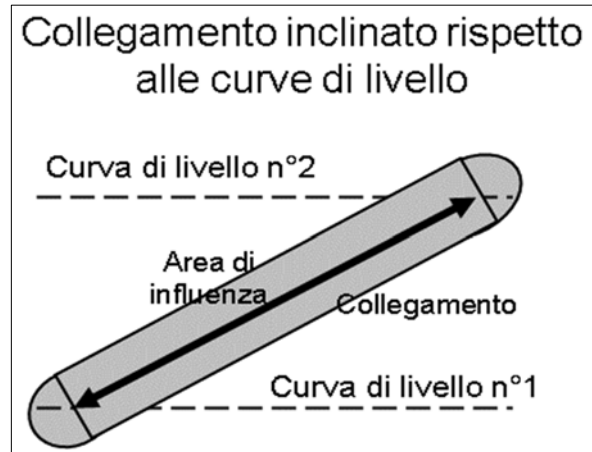


Figura 17

Schema di un collegamento realizzato secondo una pendenza inferiore a quella del terreno

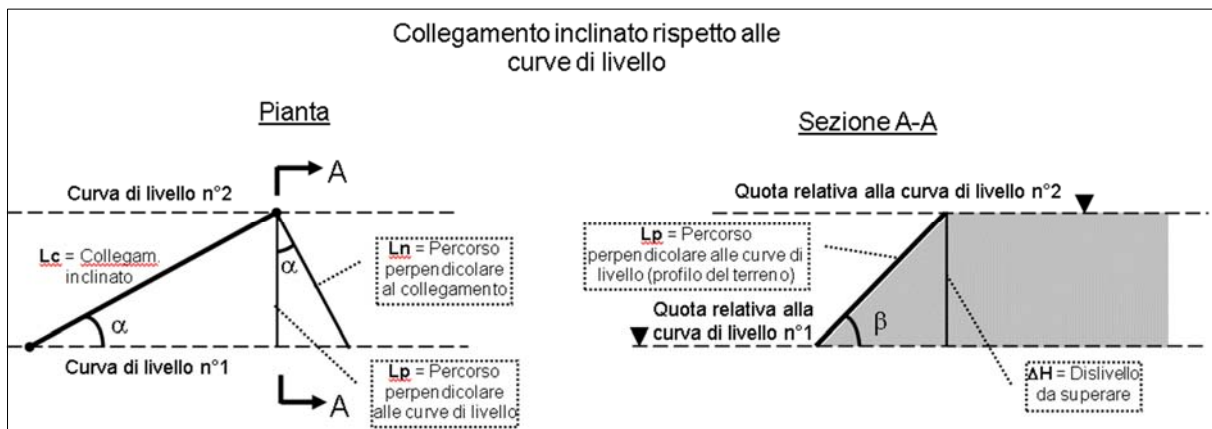


Figura 18

Schemi per il calcolo degli elementi geometrici

Con riferimento alle figure 16, 17 e 18 si adotta la seguente simbologia:

- L_c = lunghezza effettiva (sviluppo) del collegamento inclinato rispetto alle curve di livello;
- L_p = lunghezza del percorso perpendicolare alle curve di livello;
- L_n = lunghezza del percorso perpendicolare al collegamento (con riferimento al disegno in pianta);
- α = angolo formato dalle curve di livello con la linea del collegamento (con riferimento al disegno in pianta);
- H = dislivello da superare (differenza fra le quote relative alle due curve di livello);
- β = angolo di inclinazione del terreno rispetto all'orizzontale (con riferimento al disegno in sezione).

Dalla pianta risulta:

$$L_n = \frac{L_p}{\cos \alpha} \quad (2)$$

e allo stesso tempo:

$$\alpha = \arcsen\left(\frac{Lp}{Lc}\right) \quad (3)$$

mentre con riferimento alla sezione è:

$$Lp = \frac{\Delta H}{\sen \beta} \quad (4)$$

pertanto sostituendo la (3) e la (4) nella (2) si ottiene:

$$Ln = \frac{\Delta H}{\sen \beta \cdot \cos\left[\arcsen\left(\frac{Lp}{Lc}\right)\right]} \quad (5)$$

Pertanto è possibile calcolare la pendenza del terreno in direzione perpendicolare al collegamento inclinato rispetto alle curve di livello che, espressa in percentuale, è data da:

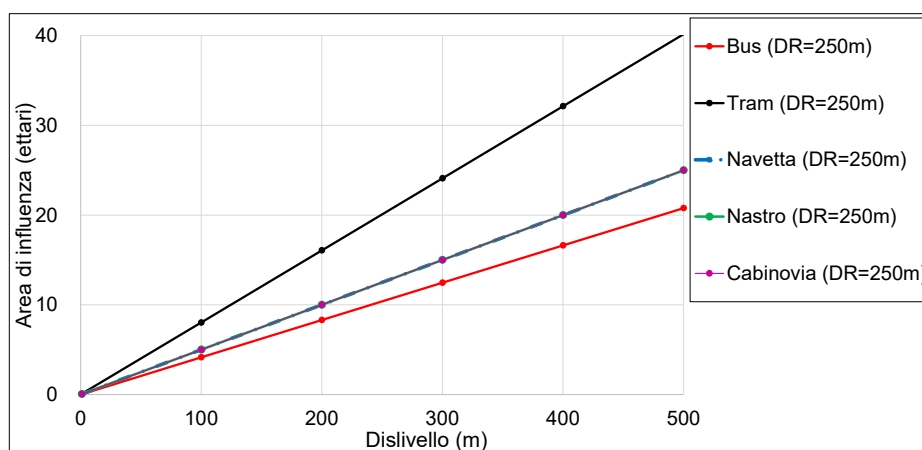
$$P(\%) = \left(\frac{\Delta H}{Ln}\right) \cdot 100 \quad (6)$$

Infine entrando nella (1) con il valore della pendenza P (%) ricavato dalla (6), si ottiene il fattore di riduzione R del raggio di influenza in funzione della pendenza in direzione perpendicolare al collegamento e, da questa, la larghezza dell'area di influenza dello specifico collegamento inserito su un terreno di pendenza assegnata β rispetto all'orizzontale e che forma con le curve di livello un angolo pari ad α . Nelle analisi svolte si sono assunte le seguenti pendenze massime superabili dai diversi sistemi messi a confronto (tabella 4) in linea con quanto già discusso al precedente paragrafo.

Sistema	Autobus	Tram	Nastro	Navetta	Cabinovia
Pendenza massima superabile	10%	5%	30°	90°	45°

Tabella 4
Pendenze massime superabili

La figura 19 presenta un andamento lineare dell'area di influenza al crescere del dislivello da superare, in presenza di una pendenza del terreno di 30° e di una distanza base di rifiuto (non corretta per la pendenza) uguale per tutti i sistemi, di 250 m. Il primo aspetto che colpisce, riguarda la perfetta sovrapposizione delle curve per il nastro, la navetta e la cabinovia, conseguenza della pendenza del terreno assunta (30°), pari alla pendenza massima superabile dal nastro che rende inutilizzabile la migliore performance in questo campo propria dei sistemi a fune.


Figura 19

Area di influenza corretta in funzione della pendenza trasversale al percorso, con pendenza del terreno = 30° e distanza di rifiuto uguale per tutti i sistemi

Da un confronto tra i risultati ottenuti si evince, inoltre, che in presenza di un dislivello pari a 300 m, l'area di influenza per la navetta, il nastro e la cabinovia è pari a 15 ettari, mentre per l'autobus è pari a 12,5 ettari e per il tram è pari a 24,1 ettari. Sotto le assunzioni anzidette il tram realizza un'area di influenza sensibilmente maggiore del nastro (e navetta) che a sua volta risulta migliore dell'autobus e questo è il primo risultato inatteso per il tram che presenta la minore propensione a superare pendenze rispetto agli altri sistemi messi a confronto.

Poiché l'elemento determinante risulta essere, più che il dislivello da superare, la pendenza del terreno su cui si deve realizzare il collegamento, si è messa in relazione, con quest'ultima grandezza, l'area di influenza di ciascun sistema sempre calcolata tenendo presente la pendenza del terreno in direzione perpendicolare alla linea che naturalmente è condizionato dalla inclinazione del suolo e dalla pendenza massima superabile dallo specifico sistema. Anche in questo caso la distanza di rifiuto presa a base del calcolo, cioè quella non corretta in funzione della pendenza, è stata assunta uguale a 250 m per tutti i sistemi messi a confronto. I risultati delle elaborazioni sono descritti dai diagrammi delle figure da 20, 21 e 22. Dall'esame delle anzidette emerge che, indipendentemente dal dislivello preso in considerazione (100, 200 e 300 m), l'area servita per l'autobus e il tram decresce in modo esponenziale con l'aumentare della pendenza del terreno che pertanto rappresenta una forte limitazione al raggiungimento dell'obiettivo di servire un'area più ampia possibile. Marcate differenze, rispetto agli schemi citati, si presentano per i restanti sistemi di trasporto fino alla pendenza del terreno pari a circa 30°, i quali, presentano un andamento costante, per poi decrescere con un trend di tipo quasi esponenziale con l'aumentare della pendenza del terreno. La differenza fra i sistemi di trasporto considerati è più sensibile per valori della pendenza del terreno inferiori ai 30° con una netta prevalenza del tram, in questo campo di valori, seguito dall'autobus e con un margine maggiore da nastro, cabinovia e navetta.

Il costo degli impianti di trasporto verticale

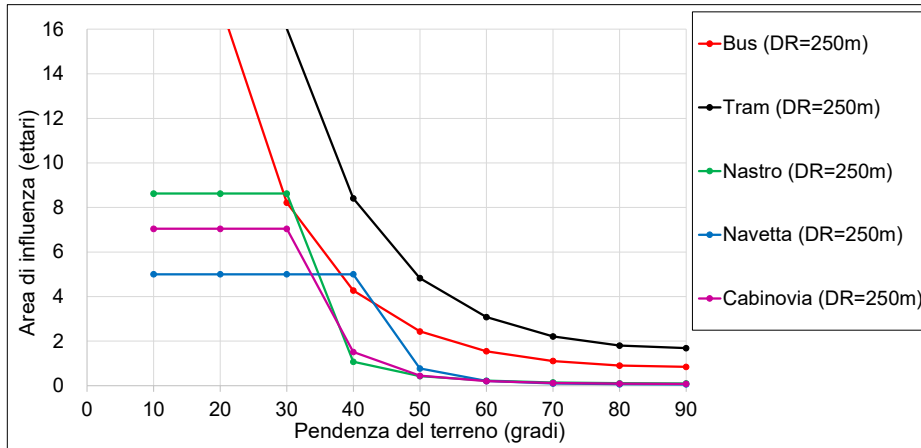


Figura 20

Area di influenza (0÷16 ha) in funzione della pendenza del terreno, per un dislivello = 100 m

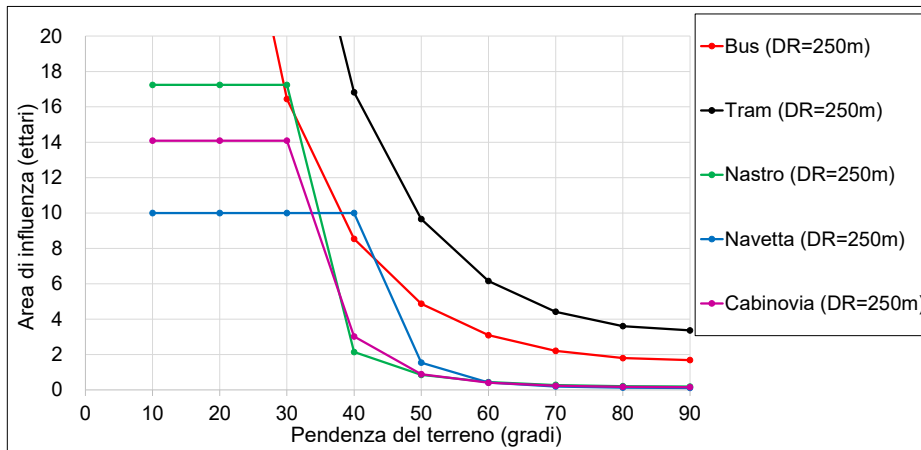


Figura 21

Area di influenza (0÷20 ha) in funzione della pendenza del terreno, per un dislivello = 200 m

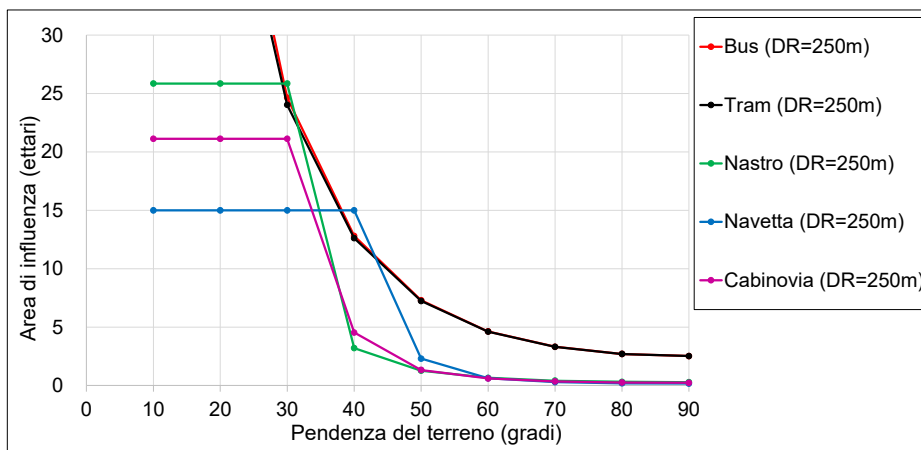


Figura 22

Area di influenza (0÷30 ha) in funzione della pendenza del terreno, per un dislivello = 300 m

È comunque da sottolineare che le maggiori performance del tram sono conseguenti a sviluppi del percorso notevolmente lunghi (necessari per superare i sensibili dislivelli in gioco) a cui conseguono costi di impianto e di esercizio molto maggiori rispetto ai sistemi concorrenti. Si evidenzia, però, come per un dislivello del terreno pari a 300 m e per pendenze inferiori a 30° (Cfr. Figura 22) è l'autobus il sistema che offre la performance migliore.

Interessante l'andamento per il nastro, il quale crolla a partire da valori della pendenza del suolo di circa 30°, di poco superiore alla pendenza massima assunta per tale sistema. Per valori di inclinazione del terreno superiori a 30° il gap tra le diverse curve si riduce all'aumentare del dislivello e in particolare, per valori superiori ai 60°, l'area di influenza di nastro, navetta e cabinovia è alquanto simile. In sintesi è possibile affermare che per massimizzare l'area di influenza in terreni acclivi è preferibile optare per sistemi che consentano di sviluppare il percorso perpendicolarmente alle curve di livello in modo da ottenere un allargamento dell'area di influenza per effetto della pendenza trasversale nulla e contenere il più possibile il percorso ottenendo così tempi di viaggio e lunghezza della linea minimi a tutto vantaggio dell'attrattività e del costo di impianto e di esercizio. Fra i sistemi in grado di superare pendenze elevate, cioè nastri, navette e cabinovie, i primi si presentano, come è noto, poco adatti a coprire distanze notevoli per effetto della velocità particolarmente ridotta, anche se, per contro, possono far valere la frequenza infinita che ne aumenta in linea di principio la distanza di rifiuto da parte dell'utente. In presenza di pendenze del terreno molto ridotte non potendosi sfruttare la capacità di superare pendenze elevate che è tipica dei nastri e delle navette il sistema vincente ai fini di massimizzare l'area di influenza del servizio risulta il tram seguito a distanza dall'autobus.

Sulla base delle aree servite calcolate sopra, si è elaborata di seguito una stima dei costi specifici per ettaro di area servita al variare della pendenza del terreno, in presenza di un dislivello di 100 m. Le figure 23, 24 e 25 riportano i diagrammi riferiti al costo di investimento ed a quello di esercizio calcolati assumendo per tutti i sistemi la stessa distanza di rifiuto (250 m) e riprodotti in scale diverse per evidenziarne i differenti intervalli.

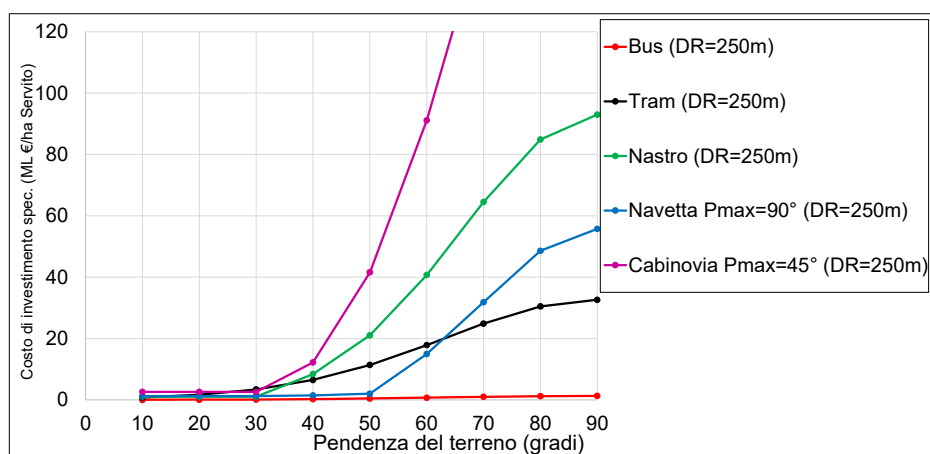


Figura 23

Costo specifico di investimento (0÷120 ML€) per ettaro di area servita in funzione della pendenza del terreno (10°÷90°), in presenza di un dislivello da superare = 100 m

Per quanto attiene al costo specifico di investimento nel campo di pendenze del terreno superiori ai 30°, la cabinovia presenta i valori massimi, più elevati anche del nastro e del tram che peraltro mostra una crescita meno che lineare. Si osserva inoltre, come il costo di investimento della

navetta risulta sufficientemente contenuto fino a pendenze del terreno di 45° per poi crescere rapidamente superando anche il tram. Nell'intervallo di pendenze del terreno comprese fra 0 e poco più di 30° invece, i costi specifici più elevati sono determinati dalla cabinovia, con l'unica eccezione proprio in corrispondenza di 30° in cui il tram assume un valore maggiore. L'autobus, invece, si presenta anche sotto questo aspetto come il sistema più economico, indipendentemente dalla pendenza del terreno superata. La particolare forma del diagramma relativo al nastro, lineare fino alla pendenza del terreno di 30° e successivamente crescente in modo esponenziale, trova una evidente motivazione nella massima efficienza espressa dal nastro finché la pendenza del terreno non supera la pendenza massima assunta per il sistema (30°).

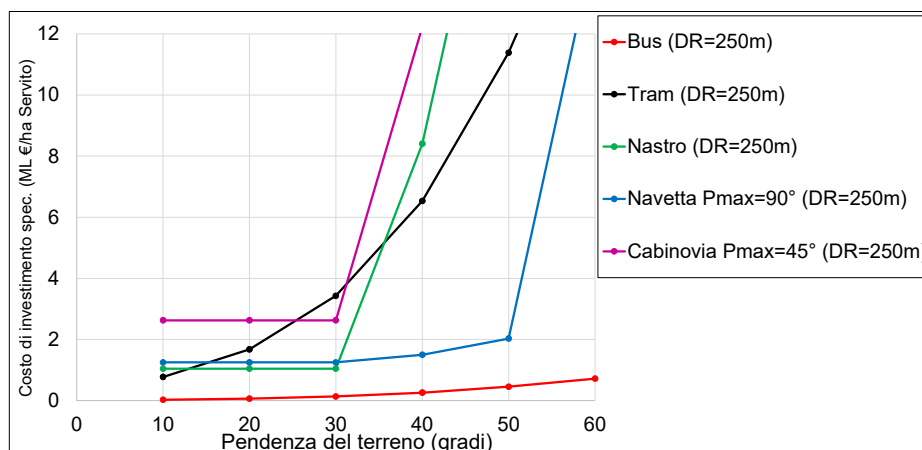


Figura 24

Costo specifico di investimento (0÷12 ML€) per ettaro di area servita in funzione della pendenza del terreno (10°÷60°), in presenza di un dislivello da superare = 100 m

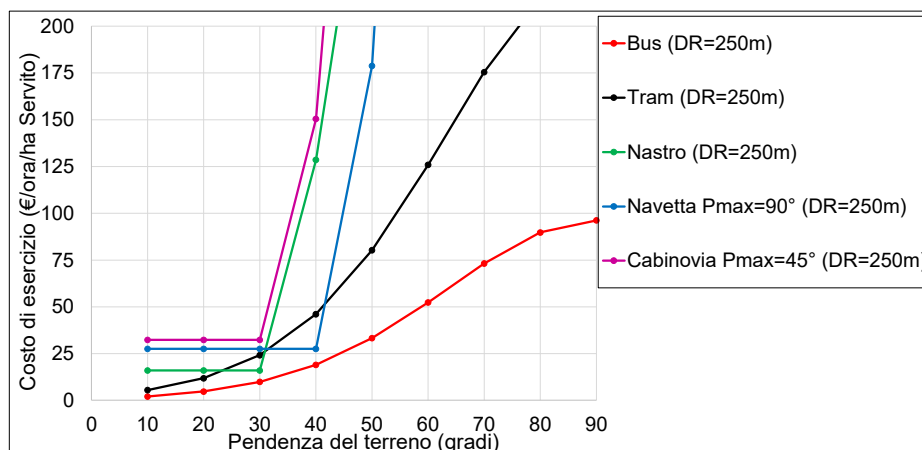


Figura 25

Costo specifico di esercizio per ora di servizio e per ettaro di area servita in funzione della pendenza del terreno, in presenza di un dislivello da superare = 100 m e di un intervallo fra le corse di 10 minuti primi

Per quanto riguarda i costi di esercizio, si evidenzia ancora come la cabinovia rappresenti il sistema più costoso, seguito immediatamente dalla navetta per pendenze del terreno inferiori a 30° e dal nastro per pendenze superiori. L'autobus realizza ancora una volta il costo minore con una crescita non lineare dello stesso tipo di quella rappresentativa del tram.

In sintesi per superare un dislivello di 100m, su un terreno che presenta una pendenza naturale media di 30° è necessario investire, per ciascun ettaro di superficie servita, 3,40, 2,63, 1,25,

1,04, 0,14 ML€ impiantando rispettivamente una linea di tram, di cabinovia, di navette, di nastri e di autobus. Se invece il terreno ha una inclinazione media di 60° i valori diventano 91,2, 40,7, 17,9, 15,0, 0,7 ML€ rispettivamente per una linea di cabinovia, di nastri, di tram, di navette e di autobus. Invece, i costi specifici di esercizio per ettaro di area servita da sostenere ogni ora per superare il dislivello di 100m, in corrispondenza di una inclinazione media del terreno di 30°, sono di 32,3 € per la cabinovia, 27,5 € per la navetta, 24,2 € per il tram, 16,0 € per il nastro e 9,9 € per l'autobus.

3. Riflessioni per un impiego efficiente ed efficace

Rilevante risulta l'andamento dei costi per posto offerto e per ettometro di dislivello superato: la navetta presenta un andamento decrescente sia del costo di investimento che del costo di esercizio specifici al variare del dislivello in conseguenza della realizzazione di economie di scala mentre gli altri sistemi mostrano una costanza per entrambe le tipologie di costo. In linea generale l'autobus si conferma il mezzo più economico a parità di prestazioni mentre il tram quello più costoso sebbene quest'ultimo possa essere preso in considerazione anche in aree acclivi quando l'obiettivo prioritario è massimizzare l'area servita o la capacità. Il dislivello da superare e la pendenza naturale del terreno incidono in modo sensibilmente favorevole sui costi dei sistemi più vocati a vincere le pendenze, quali il nastro e la navetta, fino ad evidenziarne la superiorità in determinati campi di applicazione. Fra questi due sistemi in particolare la navetta, che può contare su una inclinazione del percorso di valore comunque alto fino alla verticalità, è da preferire nel momento in cui dislivelli elevati e pendenze del terreno superiori a quelle ammesse per i nastri (30°) consentono di realizzare percorsi più diretti e quindi più brevi con evidente risparmio sui costi di investimento e di esercizio. Entrambi questi sistemi possono realizzare costi di esercizio molto contenuti, ma il nastro a differenza della navetta permette l'eliminazione del personale di manovra ed anche di quello per la sorveglianza dell'impianto dal momento che non richiede alcuna operazione di evacuazione dei passeggeri in caso di fermo improvviso per avaria durante la corsa.

Importante è il riferimento dei costi alla superficie dell'area di influenza. Infatti l'obiettivo di un servizio di trasporto, soprattutto se urbano, non si limita alla realizzazione di un collegamento fra i capolinea ma spesso consiste prevalentemente nel rendere accessibili le aree da questo attraversate. In tal senso la superficie servita diventa una prestazione molto importante soprattutto se calcolata, come estesamente descritto in precedenza, tenendo conto della distanza di rifiuto dell'utente nei confronti dello specifico sistema opportunamente corretta in funzione delle pendenze da superare a piedi per raggiungere la fermata.

L'analisi dei costi per ettaro di area servita ha poi evidenziato come la soluzione più costosa è rappresentata dalla cabinovia. Anche per quanto riguarda il costo di esercizio la medesima rappresenta il sistema più costoso, seguito immediatamente dalla navetta per pendenze del terreno inferiori a 30° e dal nastro per pendenze superiori. Il tram si colloca in una posizione intermedia tra i citati sistemi e l'autobus che rappresenta la soluzione più vantaggiosa, sia dal punto di vista dei costi di investimento che da quelli di esercizio.

A prescindere dai costi, nella scelta dell'offerta di trasporto vanno tenute in considerazione le caratteristiche particolari di alcuni sistemi che possono orientare la preferenza verso una alternativa anche se non risulta la più efficiente in termini economici. In particolare è bene non dimenticare due aspetti che esulano dai parametri oggetto di questo studio e cioè la flessibilità tipica dell'autobus, conseguenza dell'assenza di impianti fissi, e la frequenza infinita dei nastri e della cabinovia che annulla il tempo di attesa per l'utente. La caratteristica menzionata per l'autobus comporta la possibilità di adattare continuamente l'offerta alla domanda in termini di percorso, di orario e di frequenza mentre la specificità del nastro e della cabinovia si traduce in una forte attrattività per l'utenza in grado di favorire il riequilibrio della ripartizione modale verso il trasporto pubblico.

Riferimenti

- Alshalalfah B., Shalaby A., Dale S., Othman F. M. Y. (2012), Aerial ropeway transportation systems in the urban environment: state of the art, *Journal of Transportation Engineering ASCE* 138, pp. 253-262
- Caserza S., (2019), Soccorso nelle funivie a va e vieni: soluzioni tradizionali e proposta di un approccio integrato - Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile, Relatore prof. Bruno Dalla Chiara, Politecnico di Torino, <https://webthesis.biblio.polito.it/11817/1/tesi.pdf>
- Dalla Chiara B., Alberto D., Zanotti G. (2022), Impianti a fune per trasporto persone e materiali – Evoluzione, elementi costruttivi, progettazione ed esercizio, EGAF, Forlì
- Petruccelli U. (2010), Prestazioni e costi dei sistemi di trasporto urbano in aree acclivi, *Trasporti e Territorio, Ingegneria Ferroviaria*, n. 4, CIFI, Roma
- Petruccelli U. (2013), Impianti di trasporto a fune ed a nastro: prestazioni e costi conseguenti alle recenti normative tecniche, *Ingegneria Ferroviaria*, n. 4, CIFI, Roma, pp.323-357
- Petruccelli U., Fabrizio D. (2023), Innovazioni normative, tecnologiche ed operative nei trasporti a fune, *Ingegneria Ferroviaria*, n.2, CIFI, Roma, pp. 113-144
- Provincia autonoma di Bolzano, Decreto del Presidente 13 novembre 2006, n. 61, Regolamento di esecuzione circa la costruzione e l'esercizio di impianti a fune in servizio pubblico
- Provincia autonoma di Bolzano, Decreto del Presidente 5 dicembre 2012, n. 44, Modifiche al regolamento sull'esercizio di linee di trasporto funiviario in servizio pubblico D.P.P. 13 novembre 2006, n. 61 - Allegato A: Formula di calcolo del costo di costruzione di impianti funiviari in servizio pubblico
- Provincia autonoma di Bolzano, Decreto del Presidente della Provincia 12 novembre 2020, n. 41, Modifica del Decreto del Presidente della Provincia del 13 novembre 2006, n. 61, Regolamento di esecuzione circa la costruzione e l'esercizio di impianti a fune in servizio pubblico
- Repubblica Italiana, Ministero dei Trasporti e della Navigazione, Decreto n. 400 del 4 agosto 1998, Regolamento generale recante norme per le funicolari aeree e terrestri in servizio pubblico destinate al trasporto di persone
- Repubblica Italiana, Decreto Legislativo 12 giugno 2003, n. 210: Attuazione della direttiva 2000/9/CE in materia di impianti a fune adibiti al trasporto di persone e relativo sistema sanzionatorio
- Repubblica Italiana, Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Decreto Dirigenziale 16 Novembre 2012, n.337, Disposizioni e prescrizioni tecniche per le infrastrutture degli impianti a fune adibiti al trasporto di persone. Armonizzazione delle norme e delle procedure con il decreto legislativo 12 giugno 2003, n. 210, di attuazione della direttiva europea 2000/9/CE
- Repubblica Italiana, Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Decreto 11 maggio 2017, n.86, Impianti aerei e terrestri - Disposizioni tecniche riguardanti l'esercizio e la manutenzione degli impianti a fune adibiti al trasporto pubblico di persone
- Repubblica Italiana, Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili, Decreto Dirigenziale 18 Giugno 2021, n. 172, Disposizioni e specificazioni tecniche per le infrastrutture degli impianti a fune adibiti al trasporto di persone

- Repubblica Italiana, Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Decreto n.157 del 28 Marzo 2018, Definizione dei costi standard dei servizi di trasporto pubblico locale e regionale e dei criteri di aggiornamento e applicazione
- Sproule W. J. (2022), Automated people movers and automated transit systems 2022, Proceedings of the 18th international conference on automated people movers and automated transit systems, ASCE
- UNI CEN/TR 115-3 (2010), Sicurezza delle scale mobili e dei marciapiedi mobili
- UNI EN 12929-2 (2015), Requisiti di sicurezza per gli impianti a fune progettati per il trasporto di persone - Disposizioni generali - Parte 2: Requisiti addizionali per le funivie bifune a va e vieni con vetture senza freni sul carrello
- UNI EN 115-1 (2017), Sicurezza delle scale mobili e dei marciapiedi mobili – Parte 1: Costruzione e installazione
- UNI EN 81-22 (2021), Regole di sicurezza per la costruzione e l'installazione degli ascensori e dei montacarichi - Ascensori per il trasporto di persone e cose – Parte 22: Ascensori elettrici inclinati
- UNI EN 115-2 (2021), Sicurezza delle scale mobili e dei marciapiedi mobili - Parte 2: Regole per il miglioramento della sicurezza scale mobili dei marciapiedi mobili esistenti
- Istituto Nazionale di Statistica (ISTAT). Rivalutazione monetaria, <https://rivaluta.istat.it/>